

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-38415

(43)公開日 平成6年(1994)2月10日

(51)Int.Cl.⁵

H02K 1/27

識別記号

庁内整理番号

501 C 7429-5H

FI

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数8(全7頁)

(21)出願番号 特願平4-194997

(22)出願日 平成4年(1992)7月22日

(71)出願人 00005083

日立金属株式会社

東京都千代田区丸の内2丁目1番2号

(72)発明者 野沢 康人

埼玉県熊谷市三ヶ尻5200番地日立金属株式
会社熊谷工場内

(72)発明者 清水 元治

埼玉県熊谷市三ヶ尻5200番地日立金属株式
会社熊谷工場内

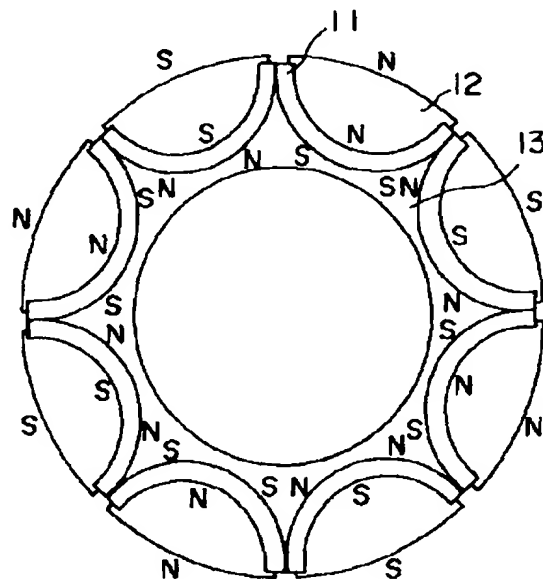
(74)代理人 弁理士 大場 充

(54)【発明の名称】 永久磁石式ロータ

(57)【要約】

【目的】 発生磁束量が大きく、高周速回転に適したロータ構造を実現する。

【構成】 内筒部12、軟磁性金属から構成される外筒部13、ならびに該内筒部12および該外筒部13との間に配置された磁氣的に一体である永久磁石11とを有し、磁極数が4極以上である永久磁石式ロータ。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 内筒部、軟磁性金属から構成される外筒部、ならびに該内筒部および該外筒部との間に配置された磁氣的に一体である永久磁石とを有し、磁極数が4極以上であることを特徴とする永久磁石式ロータ。

【請求項2】 外筒部に形成される磁極は隣接する磁極と磁氣的に分離されているが、軸端で機械的に結合している請求項1記載の永久磁石式ロータ。

【請求項3】 永久磁石が $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を主たる構成相とする請求項1または2に記載の永久磁石式ロータ。

【請求項4】 回転軸に垂直な断面上でロータ中心から磁石の重心を通る直線を引いたときに、外筒部が該直線上に存在する請求項1～3のいずれかに記載の永久磁石式ロータ。

【請求項5】 回転軸に垂直な断面において、前記永久磁石の曲率半径が場所により異なる請求項1～3のいずれかに記載の永久磁石式ロータ。

【請求項6】 永久磁石厚さよりも前記外筒部の磁極間の最短距離が小さい請求項1～5のいずれかに記載の永久磁石式ロータ。

【請求項7】 ロータ磁極1極あたりの表面磁束密度が永久磁石内部の磁束密度よりも大きい請求項1～6のいずれかに記載の永久磁石式ロータ。

【請求項8】 回転軸に垂直な断面上での磁石の磁極面の平均長さをロータ外周における磁極1極の長さより長い請求項1～6のいずれかに記載の永久磁石式ロータ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は永久磁石を用いたモータ用ロータ及び発電機用ロータに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 Sm-Co や Nd-Fe-B 等の高エネルギー積の希土類永久磁石材料の発達と、半導体を用いた制御方法の一般化に伴って、ブラシレスDCサーボモータ、ACサーボモータが、広範な領域で使用されるようになってきている。近年、環境問題が再びクローズアップされるのに伴って、電気自動車や電動バイクの開発が活発化している。これらの推進用途に用いられるモータには、誘導モータよりも小型化が可能な永久磁石を用いた同期モータが適していると考えられる。同期モータのロータには、(1)小型化を実現するために、ロータ表面で高い磁束密度を有すること、(2)永久磁石が熱サイクルや高速回転により、減磁や破壊を起こさないこと、といった要求がある。また、これらの推進用モータでは、減速時に再生制動と呼ばれる発電を行うことが一般的である。この時、永久磁石には逆磁界がかかるため、永久磁石が減磁しないことが重要である。

【0003】これらの永久磁石を使用したモータに用いられるロータ構造としては、大きく分けて以下の2種類が知られている。1つは、永久磁石を軟磁性金属のロー

2

タ外周部に接着剤で張り付けるタイプ（以下、外周磁石ロータと呼ぶ）であり、もう1つは永久磁石をロータ内部から放射状に並べて、同極反発を利用してロータ外周部に磁束を取り出すタイプ（以下、同極反発ロータと呼ぶ）である。図5に外周磁石ロータの1例を示す。図5において1は永久磁石、2は軟磁性金属からなるロータ基体であり、永久磁石1は通常ロータ基体2の外周面に接着剤で固定される。外周磁石ロータは、例えば「Proceeding of 10th international EV symposium, p214」に開示されている。図6に同極反発ロータの1例を示す。図6において1は永久磁石、2は軟磁性金属からなるロータ基体である。同極反発ロータは、例えば特開昭58-46859号公報、特公昭63-41307号公報に開示されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】従来の外周磁石ロータでは、以下の問題点があった。1つは、永久磁石とロータ基体の熱膨張係数の差により生ずる熱応力と高速回転により生ずる遠心力のために、永久磁石がロータから剥離して回転中のロータが破壊することである。従来のサーボモータが数kW以下の小型モータ用に作られていたのに対し、電気自動車用モータが典型的には20～40kWの出力が必要のため、ロータ径、最大回転数共に増加する。このため、ロータ外周部での遠心力（ロータ径と回転数の積に比例する）が増加する。また、ステータの交流磁束によりロータ表面で発生する渦電流は回転数が大きくなるほど増加するため、ロータの発熱量が増加する。この遠心力の増加と発熱量の増加によって従来のサーボモータの場合に比べロータ破壊の可能性が高くなる。

【0005】ロータは、電気自動車等の場合には一般に最低-40℃から最高100℃以上の温度にさらされる。希土類磁石で最も多く用いられている Nd-Fe-B 系磁石と鉄の熱膨張係数は大きく異なり、その差は14ppmにも達する。温度差±70℃での歪は約±0.1%となり、ヤング率 $2 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ を乗すると、界面での応力は±2000 kgf/cm^2 となる。外周磁石ロータの接着層が薄い場合には、歪を吸収できずに磁石が剥離してしまう。

【0006】外周磁石ロータにおける回転による遠心力をある例で計算する。磁石ロータ外径を150mm、磁石材質を Nd-Fe-B 、磁石厚さを5mm、最高回転数を10000rpm(167Hz)とする。永久磁石の固定を接着により行った場合、遠心力の大きさは、29 kgf/cm^2 となる。永久磁石の引っ張り強度は約800 kgf/cm^2 であるから永久磁石が破壊することはないが、常温での接着剤の接着温度はせいぜい200 kgf/cm^2 であり、温度が上昇して接着強度が低下した状態では、長期の接着を保証することは難しい。希土類磁石は金属間化合物であるため、通常の鉄系構造

材料に比べて、引張り応力による破壊が生じやすい。このため、希土類磁石を楔形押さえ部材で機械的に固定する例も提案されている（特開昭58-99252公報）。しかし、永久磁石の残留応力や長期の熱応力に起因する永久磁石の破壊の危険性を完全に排除することは難しい。

【0007】もう1つの問題は、外周磁石ロータのロータ径とロータ長さが決まるとトルク係数（出力はトルク係数と電流と回転数の積に比例する）がほぼ決まってしまう、高性能化しにくいという問題があった。トルク係数はロータ1極あたりの有効磁束量と磁極数の積に比例するが、極数を増やしたとしてもその分1極あたりの面積が減少し1極あたりの有効磁束密度が減少するため、トルク係数の増加をあまり望むことはできない。

【0008】これに対して、同極反発ロータはロータ径、ロータ長さ、永久磁石形状を一定にして磁極数を増加させると、1極あたりの有効磁束量があまり減少しないためにトルク係数が増加する。この点で同極反発ロータは多極化により高性能化が可能であるという特徴を有する。

【0009】しかしながら、従来の同極反発ロータは以下の問題点を有していた。1つは、永久磁石が放射状に配置されているため、ロータ内周部での磁束の短絡が発生し、永久磁石の発生する磁束がロータ外周部に集中せず、永久磁石体積の割に磁束発生効率が悪いことである。このため、同極反発ロータの使用例はあまり多くない。

【0010】もう1つは、磁束発生効率が悪いために内径を小さくする必要があり、ロータの慣性モーメントが外周磁石ロータよりも大きく、制動性が悪いという問題があった。また、実開平2-44850号には、磁石をロータ内部に組み込む方式が提案されている。しかしこの方式では、磁石の内外周に配置されるサブコアが同一の磁性体であるため、(1)磁束の一部が磁性体外部に出ずに短絡する、(2)磁束の短絡のために各磁石間に形成された溝部を大きくすると機械的強度が弱くなり遠心力に耐えられない、という問題がある。

【0011】本発明の主たる目的は、永久磁石を用いたモータ用ロータ及び発電機用ロータにおいて、発生磁束量が大きく、高周速回転に適したロータ構造を実現することにある。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記問題点を解決するために本発明において、以下の手段を用いた。技術ポイントとしては、遠心力に抗するために永久磁石をロータ内部に埋め込み、軟磁性金属により永久磁石を機械的に保持したこと、永久磁石の発生する磁束の大部分を軟磁性金属を通してロータ外周に供給することにより、発生磁束量を従来の同極反発ロータよりも向上したことにある。

【0013】すなわち、ロータ基体を内筒部および軟磁性金属から構成される外筒部とから構成し、この内筒部と外筒部との間に磁氣的に一体である永久磁石とを配置した磁極数が4極以上である永久磁石式ロータを用いることにより、前記問題を解決した。

【0014】

【作用】以下本発明を詳述する。まず軟磁性金属から構成される外筒部について説明する。本発明では、この外筒部が永久磁石を機械的に保持する働きと、永久磁石の発生する磁束をロータ外部に効率よく通す働きの2通りの役目をはたしている。

【0015】外筒部が永久磁石を機械的に保持する利点は先に述べた遠心力対策と熱膨張対策である。本発明の方式では永久磁石をロータ内に埋め込んだ構造となっており、ロータ回転時に発生する遠心力を外筒部で機械的に受けとめるためきわめて信頼性が高い。この理由は、軟磁性金属、通常は鉄系材料が大きなヤング率と大きな破断伸びと大きな破壊靱性を有することに起因する。永久磁石を配置する部分、すなわち内筒部と外筒部とにより形成される空間を適切に設定すれば、熱膨張を原因とする永久磁石の破壊を阻止することができる。

【0016】永久磁石を機械的に保持するためには、ロータ中心から永久磁石の重心を通る直線を引きいたときに、この直線状に外筒部が位置するようにすればよい。また、永久磁石の曲率半径を場所により変更することにより回転軸に垂直な平面上で永久磁石が移動しないようにすることもできる。さらに、永久磁石が脱落しないように永久磁石厚さよりも外周の軟磁性金属の磁極間の最短距離を小さくすることもできる。なお、外筒部の磁極間は磁気効率を高めるために、磁氣的に分離していることが望ましい。これら3つの方法の2つ以上を組み合わせてもよい。

【0017】永久磁石が回転時にロータに固定される様に、接着剤、シール剤、樹脂成形、金属ダイキャスト等の方法を用いて、ロータと磁石を固定することが望ましい。これらの処理を永久磁石の常用温度よりも高い温度で行えば、処理後に永久磁石の残留する応力が圧縮応力となり、永久磁石が破壊しにくくなる。

【0018】ロータ基体を内筒および外筒から構成される形状に形成する方式としては、大きく分けて3通りがある。1つは、プレスで打ち抜いた薄い軟磁性金属（典型的には珪素鋼板）を積層し、ロータ軸に固定する方法である。2つめは、軟磁性金属を鋳造し、必要に応じて加工する方法である。3つめは、軟磁性金属粉末をプレスまたは射出成形等の公知の方法により、所定の形状に成形した後に焼結し、必要に応じてサイジングプレスを行う方法である。これらの方法は、形状、要求される軟磁性金属の磁気特性、コスト等の要因によって適宜選択される。

【0019】3番目の方法は、加工なしにある程度の精

度を実現することが可能であり、また内筒部内周にギアを一体成形可能という特徴を有している。このギアを利用して減速機をロータ内に組み込み、モータの質量当たりの出力を高めることが可能であり、工業的有用性が高い。この軟磁性金属は従来よく知られているねじ止め、リベット、溶接等の手法で回転軸に取り付けられる。

【0020】本発明では、磁氣的に一体である永久磁石の発生する磁束が軟磁性金属を通してロータ外周側に供給されるロータ形状とすることにより、従来の同極反発ロータよりも磁束発生効率を向上させた。このためには、従来の同極反発ロータが有していたロータ内径側の磁束の漏れを少なくするように永久磁石を配置すれば良い。ここで、磁氣的に一体であるとは、回転軸に垂直な断面において、ロータ外周に現れる磁極に対応する永久磁石が分割されていない、または、着磁された複数の永久磁石が同一極が並ぶようにして接触または小さな隙間をもって配置しており、磁気回路上は一体の永久磁石と見なせる状態をいう。

【0021】これらの例を図1、図2に示す。図1、2において11、21は永久磁石、12、13はそれぞれ軟磁性金属から構成される外筒部、内筒部である。内筒部3は永久磁石間の磁気抵抗を少なくする働きをしている。図1は、永久磁石が分割されていない場合の例である。図2は永久磁石が分割されているが、磁氣的に一体の場合の例である。永久磁石が発生する磁束の約80%以上がロータ外周部に供給されれば、磁氣的に一体であると考えてよい。図1において、外筒部12は回転軸に垂直な断面上でロータ中心から磁石の重心を通る直線上に位置し永久磁石11を機械的に拘束する。また図1の永久磁石11は内外周の曲率半径が一樣であるが、例えば曲率半径大と小の組み合わせからなるようにすれば磁石の周方向への動きを拘束することができる。さらに、図1および図2に示す磁石11、12の厚さが磁極間の最短距離14、24が大であれば、磁石がロータ外へ脱落することを防止することができる。図7に本発明によるロータの粗立例斜視図を示す。図7において、ロータ10は図1に示す形態を有し隣接する磁極は磁氣的に分離されているが、ボルト孔16を有するシャフト部材15を図示しないボルトによって締結することにより機械的に結合される。

【0022】外周磁石ロータでは、ロータ磁極1極あたりの平均表面磁束密度が永久磁石内部の平均磁束密度よりも小さい。これに対して、同極反発ロータや本発明のロータでは、ロータ磁極1極あたりの平均表面磁束密度を永久磁石内部の平均磁束密度よりも大きくすることが可能である。たとえば、回転軸に垂直な断面上での永久磁石の磁極面の平均長さをロータ外周の磁極1極の長さよりも長くすることにより、実現される。また、特開昭58-46859号公報に開示されるように外筒部の表

面形状を変えて、角度変化による磁束密度変化を調節することも可能である。

【0023】次に、本発明に用いられる永久磁石および軟磁性金属について説明する。本発明において、希土類永久磁石とは、 SmCo_5 、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{N}$ や $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 等の希土類元素と強磁性遷移元素の金属間化合物を主たる構成相とする永久磁石を意味する。これらの永久磁石は粉末冶金法、塑性加工法（鍛え込み、圧延、押し出し等）、ボンド磁石等の方法により製造可能である。本発明はエネルギー積が高く、軟磁性金属と熱膨張係数が大きく異なる $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を主相とする永久磁石を使用する場合に特に有効性が高い。本発明における軟磁性金属は、フェライトの様な酸化物セラミックスを含まず、鉄、ニッケル、コバルト及びそれらを主元素とする強磁性合金を意味する。典型的な軟磁性金属としては、純鉄、低炭素鋼、珪素鋼板、パーメンジュール等を挙げることができる。

【0024】本発明において磁極数を4極以上とするのは、2極では磁束量が外周磁石ロータよりも劣るためである。4極以上であれば、同極反発ロータの方が外周磁石ロータよりも同等もしくは同等以上の磁束を発生可能である。この理由を簡単に述べる。永久磁石の材質と磁石内部の平均磁束密度 B_d が同じであり、磁気飽和が起これなければ、ロータ1極あたりの有効磁束量 ϕ は以下の通りとなる（ロータ磁極数を n （ n は2以上の偶数）、ロータ外径を R 、ロータ内径を r 、ロータ長さを L とする）。外周磁石ロータでは、ほぼ

$$\phi_1 = B_d \cdot 2\pi R L / n \quad (\text{磁石厚さを無視})$$

同極反発ロータでは、ほぼ

$$\phi_2 = B_d \cdot 2RL \cdot (R-r) / (R+r)$$

（磁石を放射状に配置した場合。磁束の内周への漏れを考慮した）であらわされる。回転軸の太さを考慮してかりに $r=0.15R$ において、 $\phi_2 > \phi_1$ を解くと、 $n > 4.25$ となる。4極（ $n=4$ ）では同極反発ロータは外周ロータとほぼ同一の磁束を発生可能である。6極以上であれば、同極反発ロータの方がより大きな磁束を発生可能であり望ましい。

【0025】

【実施例】実施例1

以下、本発明を実施例により説明する。永久磁石として、 $B_r: 11\text{ kG}$ 、 $iH_c: 26\text{ kOe}$ のアーキ状の Nd-Fe-B 系磁石を粉末冶金法により作製した。磁化容易軸が半径方向に一致するように結晶粒を配向させてある。アーキの外周半径、内周半径、アーキ幅、アーキ長さはそれぞれ25mm、20mm、38mm、50mmであり、バレル研磨によりシャープエッジを除去した後、Niメッキを行った。外径150mm、内径100mm、長さ100mm（回転軸を含まず）のロータ基体を構成する軟磁性金属（JIS S10C）に切削加工とワイヤー放電加工を施して、前記磁石が入る穴12

個と、回転軸に固定するためのM8のネジ穴24個を外周付近に開けた。このロータ基体は図1に示したのと同様の形状を有する。これらの穴にシリコン系シーラ剤を塗布した永久磁石を計24個挿入した。

【0026】前記ロータ基体をステンレス製ロータ回転軸にM8でネジ止めし、磁極数12のロータを製作した。カウンターウェイトを取り付けて、本ロータのダイナミックバランスをとった後、専用着磁ヨークを用いて、常温で組み込みパルス着磁(20kOe, 5ms)をおこなった。比較のために、磁石厚さ、ロータ内外径を同一とした外周磁石ロータ(比較例1、エポキシ系接着剤により接着)、同極反発ロータ(比較例2)を製作し、ギャップ1.0mmを隔ててステータを配置した。ロータ表面磁束密度、磁石中心の磁束密度を測定した。結果を表1に示す。

【0027】

【表1】

	磁 束 密 度(kG)	
	ロータ表面	磁石中心
実施例1	11.7	8.7
比較例1	9.3	9.3
比較例2	9.6	7.0

【0028】本発明例ではロータ表面での磁束密度が他の比較例よりも高く、優れている。比較例1は磁石内部とロータ表面での磁束密度がほぼ同一である。比較例2の同極反発ロータは内径側で磁束が短絡するために、得られる磁束密度が低い。実施例1および比較例1が良好*

	材 質
実施例2	SmCo ₅
実施例3	Sm ₂ Co ₁₇
実施例4	Nd ₂ Fe ₁₄ B
比較例3	Nd ₂ Fe ₁₄ B

【0034】常温ではどのロータもスピントストに耐えることがわかる。次に-40℃と180℃の間で100サイクルの熱衝撃テストを行った。その後に再び常温でスピントストを行った。結果を表4に示す。

【0035】比較例3は、回転数が小さい領域で磁石が剥離してしまった。熱衝撃テストにより接着強度が低下したためと考えられる。実施例2~4では磁石は破壊しなかった。本発明の方式は、軟磁性金属と熱膨張係数の差が大きいNd系の磁石を使用したときに磁石の剥離、破壊が起こらず望ましい。

【0036】

【表4】

	回 転 数(Hz)			
	50	100	150	200
実施例2	○	○	○	○
実施例3	○	○	○	○
実施例4	○	○	○	○
比較例3	○	×	—	—

*な結果を示した。

【0029】次に80℃でスピントストを行った。○は異常なし、×は磁石のロータからの剥離、—は試験を行わなかったことを意味するものとする。

【0030】

【表2】

	回 転 数(Hz)			
	50	100	150	200
実施例1	○	○	○	○
比較例1	○	○	×	—
比較例2	○	○	○	○

【0031】比較例1の外周磁石ロータでは高速回転により、磁石が剥離してしまった。本発明は、磁束密度が大きく、高速回転での信頼性も高いロータ構造であることがわかる。同極反発ロータも本発明と同様に高速回転に対する信頼性が高い。

【0032】実施例2~4(磁石種類)

磁石材質を変更する以外は、実施例1と同形状のロータを作製した。SmCo₅、Sm₂Co₁₇は粉末冶金法により作製した。Nd系磁石は溶湯急冷法により作製した粉末を700℃で据え込み加工を行うことにより作製した。25℃で、150Hzでスピントストを行った。比較例3は比較例1と同形状の外周磁石ロータにて行った。

【0033】

【表3】

熱膨張係数	スピント
13×10 ⁻⁶	○
11×10 ⁻⁶	○
-1×10 ⁻⁶	○
-1×10 ⁻⁶	○

※【0037】実施例5~10(磁極数による差)

ロータ外径を150mm、ロータ内径を90mm、ロータ長さを50mmとし、着磁した磁石を軟磁性金属部品に挿入、接着して、図3に示すn回(2≤n≤9)回転対称を有する形状のロータを製作した。nは磁極数の半分になる。なお、図3において31a、31bは永久磁石、32、33はそれぞれ軟磁性金属から構成される外筒部および内筒部である。実施例1と同様のステータに挿入し、ロータ表面磁束密度を測定した。結果を表5に示す。

【0038】磁極数を増加させるほど、ロータ表面の磁束密度が増加する。磁極数が18極では、ステータが磁氣的に飽和したので、16極とあまり変わらなかった。実施例5~10までのロータの200Hzまでのスピントストでは磁石の飛散は起こらなかった。

【0039】

【表5】

実施例	磁極数	磁束密度(kG)
5	4	8.0
6	6	9.5
7	8	11.0
8	12	12.0
9	16	13.2
10	18	13.6

【0040】実施例11（磁石保持方法による差）

磁石の断面形状を変えて、図4に示す8極ロータを製作した。図4において41は断面し字状の永久磁石、42、43は軟磁性金属から構成される外筒部および内筒部である。ロータの200Hzまでのスピントストでは磁石の飛散は起こらなかった。

【0041】

【発明の効果】本発明により、表面磁束密度が高く、高回転に耐える信頼性の高いロータ構造を実現可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】磁石が分割されていない場合の発明例を示す図である。

【図2】磁石が分割されているが、磁氣的に一体の場合の発明例を示す図である。

【図3】 n 回（ $2 \leq n \leq 9$ ）回転対称を有するロータの発明例（図はロータの n 分の1を表示）を示す図である。

【図4】磁石の極半径が場所により異なる発明例を示す図である。

【図5】従来の外周磁石ロータを示す図である。

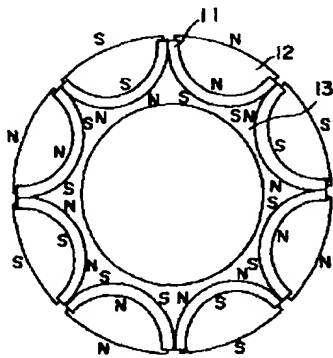
【図6】従来の同極反発ロータを示す図である。

【図7】本発明ロータの組立例を示す斜視図である。

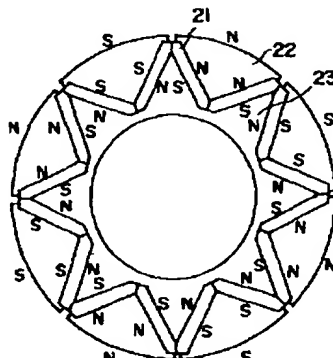
【符号の説明】

1, 11, 21, 31a, 31b, 41 永久磁石
2 ロータ基体
12, 22, 32, 42 外筒部
13, 23, 33, 43 内筒部

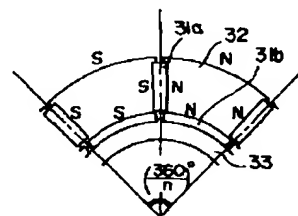
【図1】



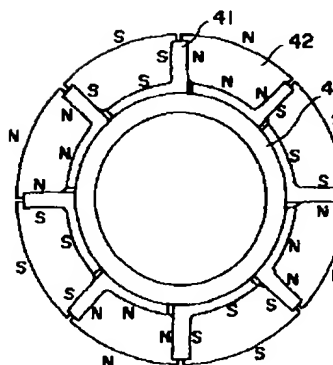
【図2】



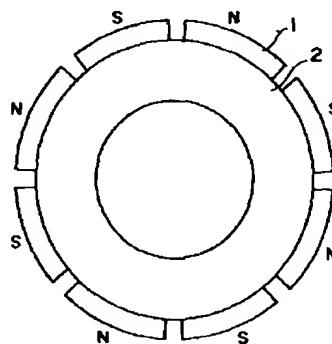
【図3】



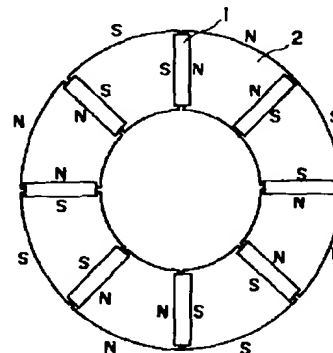
【図4】



【図5】



【図6】



(7)

特開平6-38415

【図7】

